

**Волинський національний університет
імені Лесі Українки**

**Актуальні проблеми хімії,
матеріалознавства та екології**

Монографія

**Луцьк
2022**

УДК 54+66+574+615
А 43

*Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради Волинського
національного університету імені Лесі Українки
(протокол № 6 від 28 квітня 2022 року).*

Рецензенти:

Мілюкін Михайло Васильович – доктор хімічних наук, Провідний науковий співробітник, Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А. В. Думанського НАНУ;

Федосов Сергій Анатолійович – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри теоретичної фізики імені А. Свідзинського Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Фершал Максим Вікторович – кандидат хімічних наук, доцент кафедри аналітичної хімії ДВНЗ «Ужгородський національний університет».

А 43 Актуальні проблеми хімії, матеріалознавства та екології:
Монографія. – Луцьк: Волинський національний
університет імені Лесі Українки, 2022. – 278 с.

Монографія містить праці, у яких викладені результати наукових досліджень у галузях хімії, хімічної технології, матеріалознавства, екологічної безпеки і охорони навколишнього середовища.

Редакційна колегія: Кормош Ж.О., Юрченко О.М., Гулай Л.Д.,
Корольчук С.І., Савчук Т.І., Лавринюк З.В.

ISBN 978-966-600-735-6

УДК 54+66+574+615
©Волинський національний
університет імені Лесі Українки,
2022

CHAPTER 13

МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ТИТАНАТУ БАРІЮ, ЩО ПРОЯВЛЯЮТЬ КОЛОСАЛЬНУ ДІЕЛЕКТРИЧНУ ПРОНИКНІСТЬ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*Плутенко Т.О. , В'юнов О.І. , Янчевський О.З., Федорчук О.П., Білоус
А.Г.*

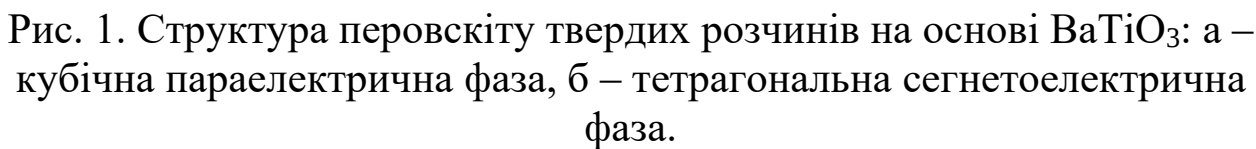
Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В.І.Вернадського НАН
України, м. Київ

Оксидні матеріали зі структурою перовськиту, які проявляють колосальну (вище 1000) діелектричну проникність в широкому частотному і температурному діапазонах, привертають значну увагу завдяки перспективам їх застосування при створенні накопичувачів енергії. Високоємні конденсатори мають малий час розряджання (мікросекунди) та дають змогу генерувати імпульси великої потужності. Це важливо при створенні медичних дефібриляторів, лазерів для дослідження атмосфери та електромагнітних систем, в яких тривалий вхідний сигнал з низькою потужністю перетворюється у потужний імпульс [1–4]. Останнім часом великий попит на високоємні діелектричні конденсатори створили нові технічні продукти, пов'язані з відновлювальною енергетикою (гібридні електромобілі, фотоелектричні мережі тощо), в яких відбувається перетворення зібраного/накопиченого постійного струму в енергію змінного струму [5, 6].

Водночас, високотемпературні діелектричні конденсаторні матеріали зі стабільною діелектричною проникністю у температурному інтервалі 50–300°C мають ряд використань, де вони є незамінними: гібридні електромобілі, авіаційна промисловість [7], розвідки нафти та газу [8], аерокосмічні системи [9], рушійні системи високої потужності [8]. Тому розробка високотемпературних діелектричних конденсаторів є актуальною задачею.

Традиційно для виготовлення конденсаторів з високою питомою ємністю використовують сегнетоелектричні матеріали на основі BaTiO₃, що характеризуються аномаліями властивостей і високими значеннями діелектричної проникності в області фазового переходу [10, 11]. В результаті виникнення спонтанної поляризації в таких матеріалах при температурах нижче температури фазового переходу

При температурах вище 120 °С BaTiO₃ є кубічним з просторовою групою *Pm3m*, а при охолодженні в результаті фазового переходу у напрямку осі четвертого порядку відбувається зміщення іонів Ti⁴⁺ на 0.12 Å від центру куба в напрямку до одного з іонів кисню, а іонів Ba²⁺ на відстань 0.06 Å, що обумовлює виникнення тетрагональної структури з просторовою групою симетрії *P4mm* (*a* = 3.99 Å, *c* = 4.03 Å) (Рис. 1).



208

виникає спонтанна поляризація і утворюються електричні диполі Ti-O, які є носіями електричних дипольних моментів.

В титанаті барію при температурі фазового переходу ($T_C = 120^\circ\text{C}$) з сегнетоелектричної тетрагональної у параелектричну кубічну фазу зникає спонтанна поляризація, що супроводжується стрибком у діелектричній проникності. З метою розмиття максимуму діелектричної проникності та зміщення температури прояву високих значень діелектричної проникності в бік високих температур до титанату барію додають сегнетоелектричні сполуки $M_{0,5}Bi_{0,5}TiO_3$ ($M = Na, K$).

У титанатах натрію-вісмуту $Na_{0,5}Bi_{0,5}TiO_3$ і калію-вісмуту $K_{0,5}Bi_{0,5}TiO_3$ однакові кристалографічні положення з координаційним числом 12 зайняті різними за радіусом і валентністю катіонами [12].

Для цих сполук характерним є статистичний розподіл катіонів у підґратці А. По наявності максимуму на температурній залежності діелектричної проникності було показано, що температура Кюрі для $Na_{0,5}Bi_{0,5}TiO_3$ становить 320°C . Титанат натрію-вісмуту $Na_{0,5}Bi_{0,5}TiO_3$ є сегнеторелаксором з розмитим сегнетоелектричним фазовим переходом, діелектрична поляризація якого в області фазового переходу має релаксаційний характер [13, 14]. У сегнеторелаксорах замість чіткого максимуму діелектричної проникності $\epsilon(T)$ в точці фазового переходу спостерігається пологий [15, 16]. Таку поведінку пов'язують з наявністю внутрішніх напружень або з нерівномірним розподілом у вузлах ґратки іонів різних елементів, що призводить до різних локальних температур Кюрі в різних мікрооб'ємах кристалу і до розмиття фазового переходу [17, 18]. Авторами [19, 20] було показано, що у титанаті натрію-вісмуту спостерігається два розмиті фазові максимуми на температурній залежності діелектричної проникності: між ромбоєдричною сегнетоелектричною і антисегнетоелектричною фазами (197°C) та між ромбоєдричною антисегнетоелектричною і тетрагональною параелектричною фазами (327°C).

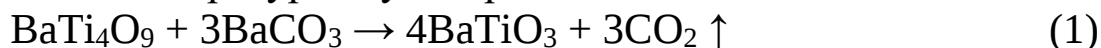
СИСТЕМА $(1-x)BaTiO_3-xNa_{0,5}Bi_{0,5}TiO_3$

Тверді розчини системи $(1-x)BaTiO_3-xNa_{0,5}Bi_{0,5}TiO_3$ ($0 \leq x \leq 0,3$) були синтезовані методом твердофазних реакцій. Вихідними реагентами для синтезу твердих розчинів були: карбонат барію $BaCO_3$, оксид титану TiO_2 , карбонат натрію Na_2CO_3 та оксид вісмуту Bi_2O_3 класифікації “ос.ч.”.

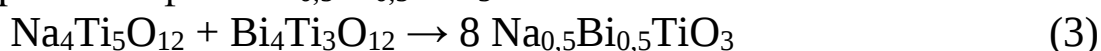
Методом рентгенофазового аналізу було показано, що утворення однофазного матеріалу $(1-x)BaTiO_3-xNa_{0,5}Bi_{0,5}TiO_3$ ($0 \leq x \leq 0,3$), що

належить до тетрагональної сингонії просторової групи $P4mm$, відбувається при температурах вище 950°C (Рис. 2) [21]. На дифрактограмах зразків, нагрітих в інтервалі температур $600\text{--}1000^\circ\text{C}$, крім вихідних компонентів присутні також фази BaTi_4O_9 , Ba_2TiO_4 , Na_4TiO_4 , $\text{Na}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ [22]. Знайдено, що під час синтезу твердого розчину $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{--}x\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ іде паралельно утворення двох фаз перовскитної структури BaTiO_3 та $\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$.

Утворення фази BaTiO_3 відбувається через фази BaTi_4O_9 та Ba_2TiO_4 в температурному інтервалі $700\text{--}900^\circ\text{C}$:



При $700\text{--}850^\circ\text{C}$, за участі фаз $\text{Na}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ та $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, утворюється фаза $\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$:



Повністю однофазним продукт стає при температурах вище 950°C . При цьому утворюється твердий розчин $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{--}x\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ по реакції:

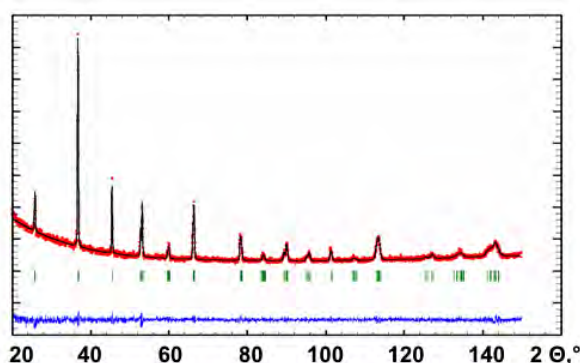
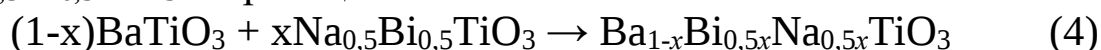


Рис. 2. Експериментальна (точки) і обчислена (лінія) дифрактограми при кімнатних температурах керамічного зразку $0.9\text{BaTiO}_3\text{--}0.1\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$.

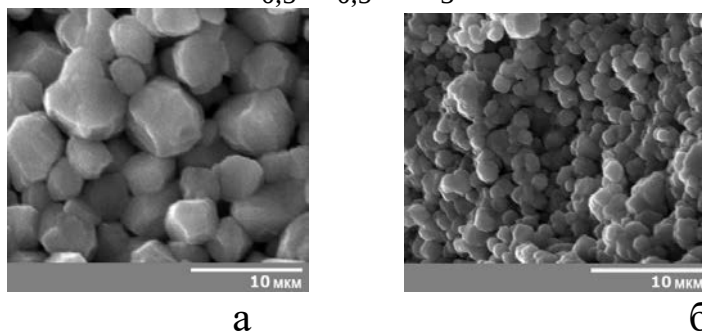


Рис. 3. Електронні мікрофотографії твердих розчинів $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{--}x\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$, синтезованих методом твердофазних реакцій: $x = 0,05$ (а); $0,25$ (б).

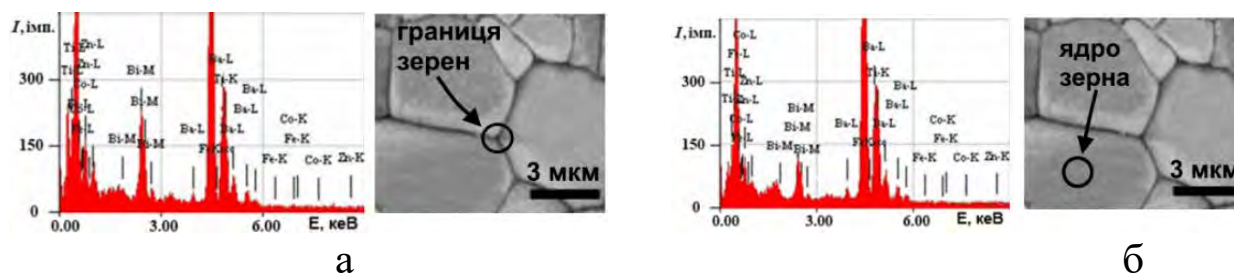


Рис. 4. Спектри енергодисперсійного рентгенівського аналізу границі (а) та ядра (б) зерен кераміки складу $0,8\text{BaTiO}_3\text{--}0,2\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$.

За допомогою методу скануючої електронної мікроскопії була досліджена мікроструктура кераміки на основі твердих розчинів $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{--}x\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$. Виявлено, що зі збільшенням x розмір зерен спеченої кераміки матеріалів зменшується від 6.4 мкм (при $x = 0,05$) до 1.5 мкм (при $x = 0,3$) (Рис. 3). Методом енергосперсійної рентгенівської спектроскопії було проведено елементний аналіз керамічних зразків. Було показано, що концентрація натрію та вісмуту на границі зерен є більшою ніж у ядрі зерна (Рис. 4). Зменшення розміру зерна із збільшенням x може бути пов'язано з сегрегацією іонів Bi^{3+} , Na^+ при спіканні поблизу границь зерен, що призводить до уповільнення швидкості транспорту речовини й утворення менших за розміром зерен [12].

Було проведено дослідження температурних залежностей діелектричної проникності і тангенсу діелектричних втрат для системи $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{--}x\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ (Рис. 5) в широкому частотному діапазоні $1 \leq f \leq 10^6$ Гц. Показано, що при збільшенні вмісту вісмуту та натрію в твердих розчинах $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{--}x\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ температура Кюри, що відповідає максимуму діелектричної проникності на Рис. 5 збільшується від 150 до 185 °C в концентраційному інтервалі $0,05 \leq x \leq 0,3$. Збільшення вмісту x в твердих розчинах на основі титанату барію призводить до розмиття фазового переходу, що пов'язано з сегнеторелаксаторними властивостями титанату вісмуту-натрію.

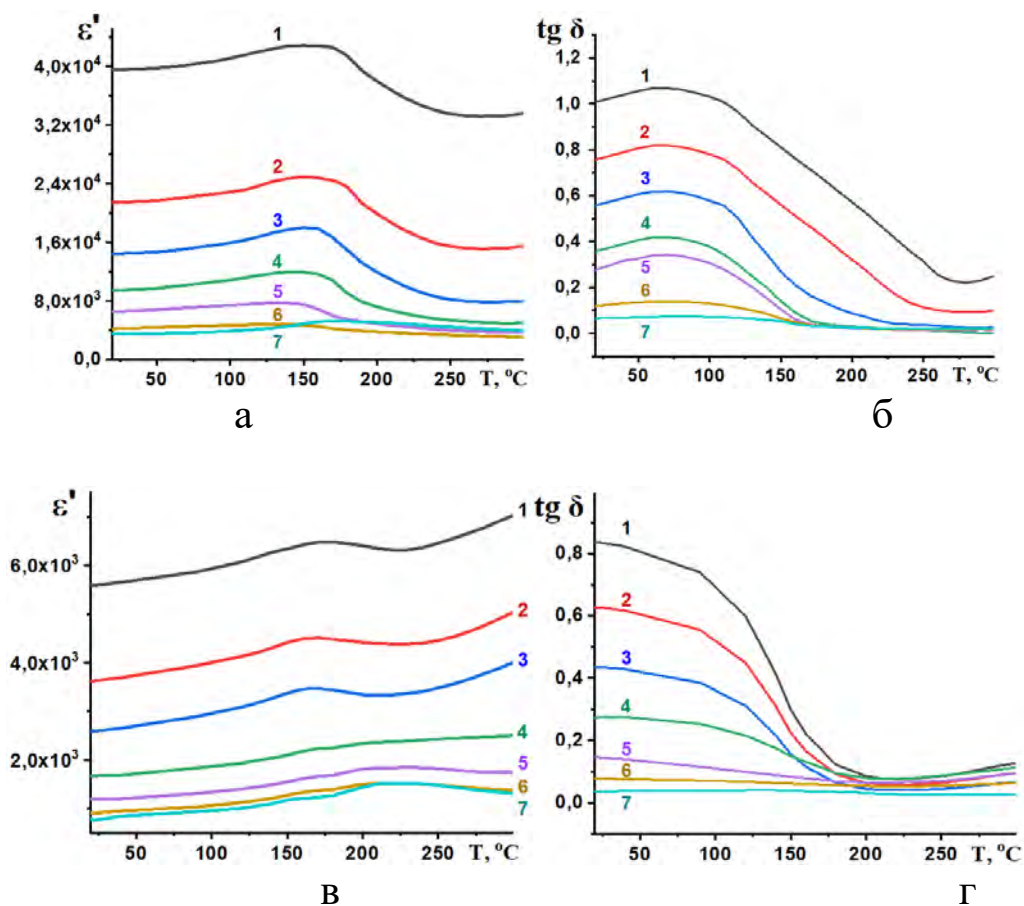


Рис. 5. Діелектрична проникність (а, в) та тангенс діелектричних втрат (б, г) твердих розчинів $0,9\text{BaTiO}_3\text{--}0,1\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ (а, б), $0,8\text{BaTiO}_3\text{--}0,2\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ (в, г) при частотах 1(1), 10^1 (2), 10^2 (3), 10^3 (4), 10^4 (5), 10^5 (6), 10^6 Гц (7).

Всі зразки системи $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{--}x\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ при $0,05 \leq x \leq 0,3$ мають високі значення діелектричної проникності $\epsilon' > 10^3$ в частотному інтервалі $1 \leq f \leq 10^4$ Гц. Збільшення концентрації титанату вісмуту-натрію x призводить до зменшення значення діелектричної проникності та зменшення тангенсу кута діелектричних втрат (Рис. 5).

Оскільки температурна стабільність є важливою величиною для високотемпературних конденсаторів, то було розраховано величину зміни діелектричної проникності з температурою $(\epsilon' - \epsilon'_{T_c})/\epsilon'_{T_c}$, де ϵ' - діелектрична проникність при різних температурах, ϵ'_{T_c} - діелектрична проникність в точці фазового переходу при температурі Кюрі. Було знайдено, що тверді розчини на основі $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{--}x\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ ($0,05 \leq x \leq 0,3$) характеризуються високою температурною стабільністю в широкому температурному інтервалі. Зокрема матеріали $0,9\text{BaTiO}_3\text{--}0,1\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ характеризуються

зміною діелектричної проникності $\Delta\epsilon'/\epsilon'_{Tc} \leq \pm 15\%$ в температурному інтервалі $20 \leq T \leq 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ та від $140 \leq T \leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ при 1 Гц та 10^6 Гц відповідно (Рис. 6). В той час як матеріали $0,8\text{BaTiO}_3\text{--}0,2\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ характеризуються зміною діелектричної проникності $\Delta\epsilon'/\epsilon'_{Tc} \leq \pm 15\%$ в температурному інтервалі $20 \leq T \leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $120 \leq T \leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ при 1 Гц та 10^6 Гц відповідно (Рис. 6).

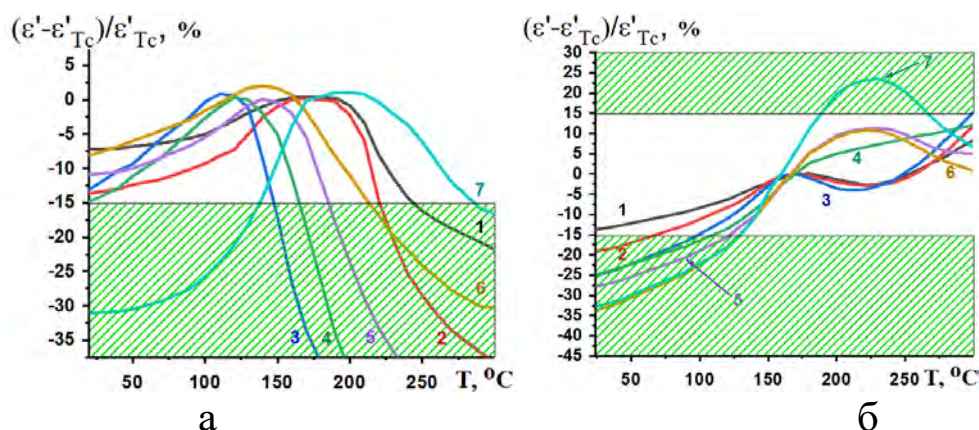
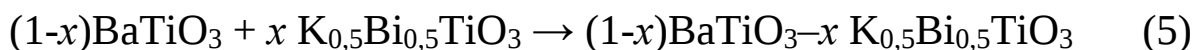


Рис. 6. Температурна залежність зміни діелектричної проникності $(\epsilon' - \epsilon'_{Tc})/\epsilon'_{Tc}$ твердих розчинів $0,9\text{BaTiO}_3\text{--}0,1\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ (а) і $0,8\text{BaTiO}_3\text{--}0,2\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ (б) при частотах 1(1), 10^1 (2), 10^2 (3), 10^3 (4), 10^4 (5), 10^5 (6), 10^6 Гц (7).

СИСТЕМА $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{--}x\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$

Тверді розчини системи $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{--}x\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ ($0 \leq x \leq 0,3$) були синтезовані методом твердофазних реакцій. Як вихідні реагенти при синтезі твердих розчинів викрикарбонат барію BaCO_3 , оксид титану TiO_2 , карбонат калію K_2CO_3 та оксид вісмуту Bi_2O_3 класифікації “ос.ч.”. Показано, що утворення твердого розчину $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{--}x\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$, що кристалізується у тетрагональній сингонії, відбувається вище $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Рис. 7) [23]. Проміжними фазами при синтезі калій-вмісних твердих розчинів є BaTi_4O_9 , Ba_2TiO_4 , $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$, K_2TiO_3 , $\text{K}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$, $\text{K}_2\text{Ti}_2\text{O}_5$ [24]. Утворення фази $\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ під час синтезу $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{--}x\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ відбувається в температурному інтервалі $700\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$ за участю фаз $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ та $\text{K}_2\text{Ti}_2\text{O}_5$. Фаза BaTiO_3 утворюється через проміжні фази тетратитанату та ортотитанату барію. Кінцевою реакцією утворення твердого розчину є:



Методом електронної мікроскопії (Рис. 8) було показано, що зі збільшенням x розмір зерен калій-вмісної кераміки $(1-x)\text{BaTiO}_3-x\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ зменшується від 5,8 мкм (при $x = 0,05$) до 1,1 мкм (при $x = 0,3$). Зменшення розміру керамічного зерна може бути обумовлено збільшенням концентрації іонів вісмуту та калію на границях зерен (Рис. 9). Концентрація іонів на границі росту зерен при спіканні призводить до утворення менших за розміром зерен в керамічному матеріалі.

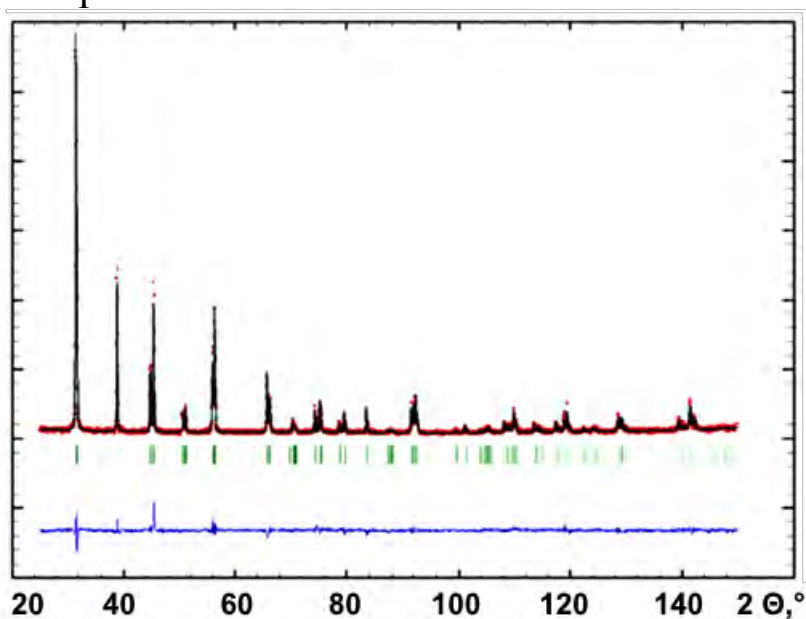
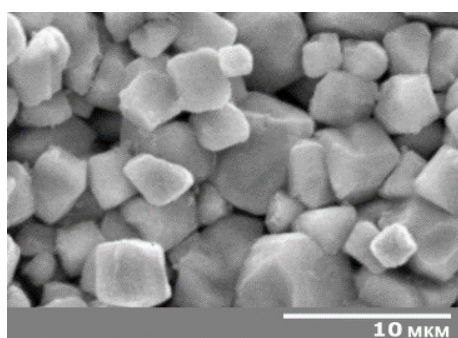
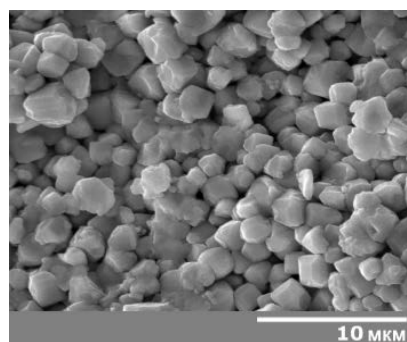


Рис. 7. Експериментальна (точки) і обчислена (лінія) дифрактограми при кімнатних температурах керамічного матеріалу $0,9\text{BaTiO}_3-0,1\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$.



а



б

Рис. 8. Електронні мікрофотографії твердих розчинів $(1-x)\text{BaTiO}_3-x\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$, синтезованих методом твердофазних реакцій: $x = 0,1$ (а); $0,25$ (б).

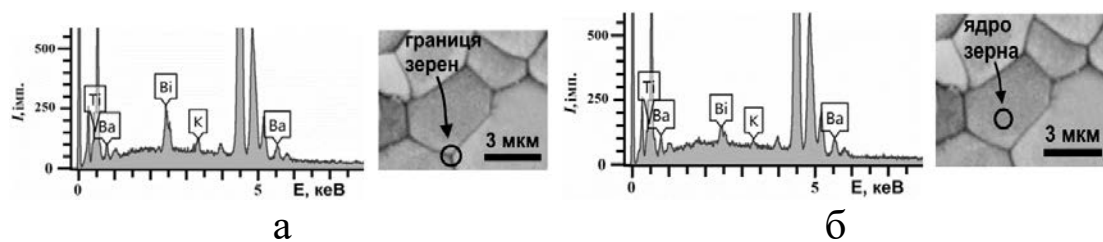


Рис. 9. Спектри енергодисперсійного рентгенівського аналізу границі (а) та ядра (б) керамічних зерен системи $0,9\text{BaTiO}_3\text{--}0,1\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$.

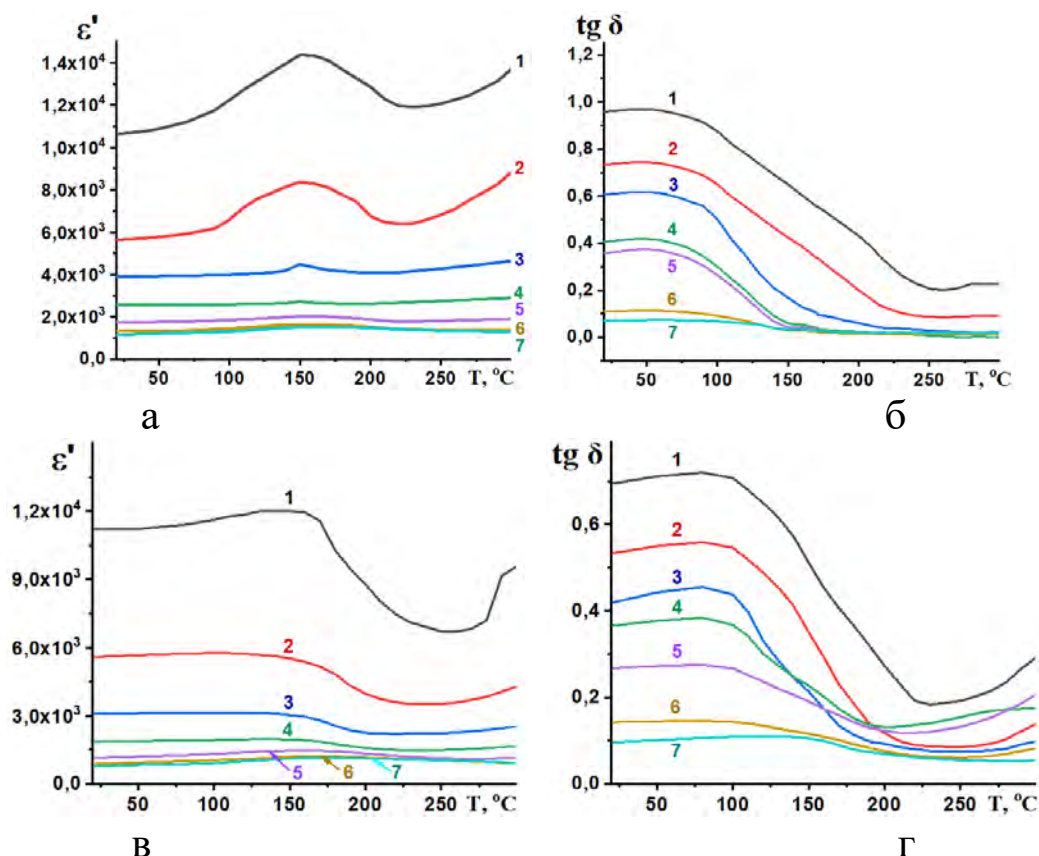


Рис. 10. Діелектрична проникність (а, в) та тангенс діелектричних втрат (б, г) твердих розчинів $0,9\text{BaTiO}_3\text{--}0,1\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ (а, б), $0,8\text{BaTiO}_3\text{--}0,2\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ (в, г) при частотах 1(1), 10^1 (2), 10^2 (3), 10^3 (4), 10^4 (5), 10^5 (6), 10^6 Гц (7).

На рис.10 приведено температурні залежності діелектричної проникності і тангенсу кута діелектричних втрат для системи $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{--}x\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ в діапазоні частот $1 \leq f \leq 10^6$ Гц. Показано, що при збільшенні вмісту калію та вісмуту температура Кюрі в твердих розчинах $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{--}x\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ становить 150, 160 і 170 °С для $x = 0,1$, 0,2 та 0,3 відповідно. Матеріали $(1-x)\text{BaTiO}_3\text{--}x\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ мають високі значення діелектричної проникності $\epsilon' > 10^3$ в частотному інтервалі $1 \leq f \leq 10^4$ Гц при $0,1 \leq x \leq 0,3$. При

збільшенні концентрації титанату вісмуту-калію значення діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат зменшується (Рис. 10).

Було показано, що тверді розчини на основі $(1-x)\text{BaTiO}_3-x\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ ($0,1 \leq x \leq 0,3$) характеризуються високою температурною стабільністю діелектричних властивостей в широкому температурному інтервалі (Рис. 11).

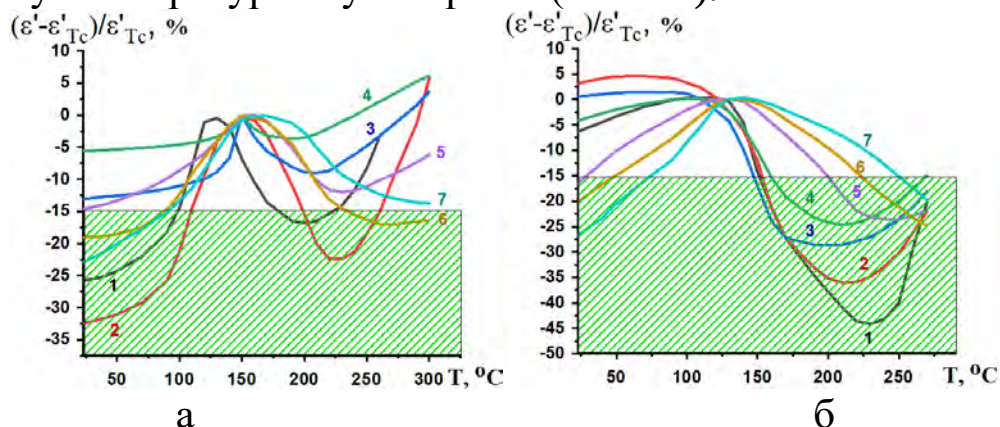


Рис. 11. Температурна залежність зміни діелектричної проникності $(\epsilon' - \epsilon'_{T_c})/\epsilon'_{T_c}$ твердих розчинів $0,9\text{BaTiO}_3-0,1\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ (а) і $0,8\text{BaTiO}_3-0,2\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ (б) при частотах 1(1), 10^1 (2), 10^2 (3), 10^3 (4), 10^4 (5), 10^5 (6), 10^6 Гц (7).

Зокрема матеріали $0,9\text{BaTiO}_3-0,1\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ характеризуються зміною діелектричної проникності $\Delta\epsilon'/\epsilon'_{T_c} \leq \pm 15\%$ в температурному інтервалі $90 \leq T \leq 300$ °C та $20 \leq T \leq 300$ °C при 10^6 Гц та 10^2-10^3 Гц відповідно. В той час як матеріали $0,8\text{BaTiO}_3-0,2\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ характеризуються зміною діелектричної проникності $\Delta\epsilon'/\epsilon'_{T_c} \leq \pm 15\%$ в температурному інтервалі $25 \leq T \leq 210$ °C (10^4 Гц), $70 \leq T \leq 260$ °C (10^6 Гц) та $20 \leq T \leq 170$ °C ($1-10^3$ Гц).

Отже, було розроблено два типи високотемпературних матеріалів з високою діелектричною проникністю ($\epsilon > 1000$), яка проявляється в широкому температурному та частотному інтервалах на основі сегнетоелектричних твердих розчинів.

В діелектричних матеріалах $(1-x)\text{BaTiO}_3-x\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ ($0,05 \leq x \leq 0,3$) та $(1-x)\text{BaTiO}_3-x\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ ($0,05 \leq x \leq 0,3$) спостерігається збільшення температури Кюрі, зменшення діелектричної константи та тангенсу кута діелектричних втрат. Показано що матеріали систем, що містять калій та натрій, характеризуються низькою зміною діелектричної проникності $\Delta\epsilon'/\epsilon'_{T_c}$

$\leq \pm 15\%$ в широких температурних інтервалах. Знайдено, що найширший температурний інтервал де $\Delta\varepsilon'/\varepsilon'_{Tc} \leq \pm 15\%$ в системі $(1-x)\text{BaTiO}_3-x\text{Na}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ ($0,1 \leq x \leq 0,2$) спостерігається на частотах $1-10$ та 10^5 Гц. В той час як в системі $(1-x)\text{BaTiO}_3-x\text{K}_{0,5}\text{Bi}_{0,5}\text{TiO}_3$ найширший температурний інтервал де $\Delta\varepsilon'/\varepsilon'_{Tc} \leq \pm 15\%$ проявляється в частотному діапазоні 10^2-10^4 Гц ($25-300$ °C) при $x=0,1$ та при 10^6 Гц ($70-270$ °C) при $x=0,2$.

Отримані керамічні матеріали можуть бути перспективними при створенні високотемпературних конденсаторів що використовуються при бурінні геологорозвідувальних свердловин, в аерокосмічній промисловості і ядерних реакторах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Chu B.J., Zhou X., Ren K., Neese B. A dielectric polymer with high electric energy density and fast discharge speed. *Science*. 2006. V. 313, № 5785. P. 334–336.
2. Khanchaitit P., Han K., Gadinski M.R. Ferroelectric polymer networks with high energy density and improved discharged efficiency for dielectric energy storage. *Nature Communications*. 2013. V. 4, № 1. P. 2845.
3. Li Q., Han K., Gadinski M. R., Zhang G. High energy and power density capacitors from solution-processed ternary ferroelectric polymer nanocomposites. *Advanced Materials*. 2014. V. 26, № 36. P. 6244–6249.
4. Li Q., Liu F., Yang T., Gadinski M. R. Sandwich-structured polymer nanocomposites with high energy density and great charge–discharge efficiency at elevated temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016. V. 113, № 36. P. 9995–10000.
5. Montanari D., Saarinen K., Scagliarini F., Zeidler D., Niskala M., Nender D. Film capacitors for automotive and industrial applications. 2009. In *Proc. CARTS*, Jacksonville, FL, Apr. 23–38
6. Bower W. Inverters-critical photovoltaic balance-of-system components: status, issues, and new-millennium opportunities. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2000. V. 8, № 1. P. 113–126.

7. Zeb A., Milne S.J. High temperature dielectric ceramics: a review of temperature-stable high-permittivity perovskites. *Journal of Materials Science*. 2015. V. 26, № 12. P. 9243–9255.
8. Li Q., Yao F.-Z., Liu Y., Zhang G. High-temperature dielectric materials for electrical energy storage. *Annual Review of Materials Research*. 2018. V. 48, № 1. P. 219–243.
9. Fan B., Liu F., Yang G., Li H. Dielectric materials for high-temperature capacitors. *IET Nanodielectrics*. 2018. V. 1, № 1. P. 32–40.
10. Ogihara H., Randall C. A., Trolier-McKinstry S. High-energy density capacitors utilizing 0.7BaTiO₃-0.3BiScO₃ ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. 2009. V. 92, № 8. P. 1719–1724.
11. Huang L., Jia Z., Kyriasis I., O'Brien S. High *K* capacitors and OFET gate dielectrics from self-assembled BaTiO₃ and (Ba,Sr)TiO₃ nanocrystals in the superparaelectric limit. *Advanced Functional Materials*. 2010. V. 20, № 4. P. 554–560.
12. Plutenko T. A., V'yunov O. I., Belous A. G., Yanchevskii O. Z. Semi-oxalate synthesis of (1-x)BaTiO₃-xM_{0.5}Bi_{0.5}TiO₃ (M = Li, Na, K) PTCR materials. *Journal of Advanced Ceramics*. 2016. V. 5, № 2. P. 117–125.
13. Gomah-Pettry J. R., Said S., Marchet P., Mercurio J. P. Sodium-bismuth titanate based lead-free ferroelectric materials. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2004. V. 24, № 6. P. 1165–1169.
14. Isupov V. A. Ferroelectric Na_{0.5}Bi_{0.5}TiO₃ and K_{0.5}Bi_{0.5}TiO₃ perovskites and their solid solutions. *Ferroelectrics*. 2005. V. 315, № 1. P. 123–147.
15. Исупов В. А. Природа физических явлений в сегнеторелаксорах. *ФТТ*. 2003. Т. 45, № 6. С. 1056–1060.
16. Li Y., Chen W., Xu Q., Zhou J. Relaxor behavior and ferroelectric properties of Na_{0.5}Bi_{0.5}TiO₃-K_{0.5}Bi_{0.5}TiO₃-KNbO₃ lead-free ceramics. *J. Mater. Sci.* 2005. V. 40, № 14. P. 3625–3628.
17. Смоленский Г. А., Исупов В. А. Сегнетоэлектрические свойства твердых растворов станната бария в титанате свинца. *ЖТФ*. 1954. Т. 24, № 8. С. 1375–1386.
18. Zhao S. Zhang L., Li G. Dielectric and ferroelectric properties of Na_{0.42}K_{0.08}Bi_{0.5}TiO₃ and Na_{0.25}K_{0.25}Bi_{0.5}TiO₃ relaxor ceramics. *Integr. Ferroelectr.* 2006. V. 78, № 1. P. 119–126.
19. И. П. Раевский, Павлов А. Н., Емельянов С. М., Попов Ю. М. Особенности эффекта положительного температурного